

# 新型大容积高压储氢容器的研制

魏啸 崔会琴 杨慧 吴樊  
荆门宏图特种飞行器制造有限公司  
DOI:10.12238/etd.v6i8.17100

**[摘要]** 本文聚焦新型大容积高压储氢容器研制。阐述了其设计理论,涵盖容器结构选型、力学性能分析及安全性能评价标准。介绍了关键技术创新,包括轻量化内胆材料开发、高性能纤维缠绕工艺等。随后说明制造工艺与质量控制,涉及核心制造流程、关键工艺控制及无损检测技术。该研究为提升大容积高压储氢容器性能、保障安全运行提供理论与技术支持,推动氢能产业发展。

**[关键词]** 大容积储氢容器; 高压氢气; 轻量化设计

**中图分类号:** TQ051.3 **文献标识码:** A

## Development of a New Large-Volume High-Pressure Hydrogen Storage Vessel

Xiao Wei Huiqin Cui Hui Yang Fan Wu  
Jingmen Hongtu Special Aircraft Manufacturing Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper focuses on the development of a new large-volume high-pressure hydrogen storage vessel. It elaborates on the design theory, including vessel structure selection, mechanical performance analysis, and safety performance evaluation standards. Key technological innovations are introduced, such as the development of lightweight liner materials and high-performance fiber winding processes. The manufacturing processes and quality control are then explained, covering core manufacturing procedures, key process controls, and non-destructive testing technologies. This research provides theoretical and technical support for improving the performance of large-volume high-pressure hydrogen storage vessels and ensuring their safe operation, thereby promoting the development of the hydrogen energy industry.

**[Key words]** Large-Volume Hydrogen Storage Vessel; High-Pressure Hydrogen; Lightweight Design

### 引言

氢能作为清洁能源,储氢技术至关重要。大容积高压储氢容器是储氢关键设备,其性能直接影响氢能应用效率与安全。当前,传统储氢容器在储氢质量密度、安全性等方面存在局限。为满足氢能产业发展需求,研制新型大容积高压储氢容器迫在眉睫。本文将深入探讨其设计理论、关键技术创新及制造工艺与质量控制,为容器优化升级提供参考。

### 1 大容积高压储氢容器设计理论

#### 1.1 容器结构类型与选型

大容积高压储氢容器结构类型影响储氢效率、安全性与适用场景,选型要综合储氢压力、容积、工况及成本等因素。主流结构有三种:全金属容器由高强度钢或铝合金整体锻造,结构简单、耐氢脆,适用于高可靠性静态储氢场景,但自重大、储氢质量密度低;金属内胆纤维缠绕容器以铝合金或钛合金为内胆,外缠高强度纤维增强层,兼具金属密封与纤维高强度特性,广泛用于车载储氢;塑料内胆纤维缠绕容器内胆为工程塑料,重量轻、储氢质量密度优势大,但需解决与氢气相容性及老化问

题<sup>[1]</sup>。选型要针对不同场景,结合压力等级和容积要求,优先选重量轻、安全性高且成本可控的类型,确保结构与需求匹配。

#### 1.2 力学性能分析

大容积高压储氢容器力学性能分析关乎安全运行,需围绕承载特性、应力分布、疲劳寿命等关键指标开展。采用理论计算与数值模拟结合的方法,先通过材料力学理论算出壁厚、应力集中系数等基础参数,明确承载能力;针对纤维缠绕结构,分析纤维铺设角度、层数对力学性能的影响,用层合板理论算各层应力分布。数值模拟利用有限元软件建三维模型,模拟充放氢压力变化引起的应力应变响应,捕捉关键部位应力集中。考虑氢致应力腐蚀、疲劳载荷等因素,通过疲劳试验获材料S-N曲线,预测疲劳寿命。还要分析温度变化对力学性能的影响,确保容器在极端工况下满足要求。

#### 1.3 安全性能评价标准

大容积高压储氢容器安全性能评价有严格标准体系,涵盖全生命周期,国际有ISO11119-2等,国内以GB/T35544-2023等为核心。评价内容包括耐压、密封、耐氢脆、疲劳及火灾安全

性能等。耐压性能通过水压和气压试验, 水压要求额定压力1.5倍下无渗漏、变形, 气压测气密性; 耐氢脆性能用氢致延迟断裂试验, 模拟高压氢环境抗脆断能力; 疲劳性能通过充放氢循环试验, 模拟压力波动; 火灾安全性能用火烧试验, 检验热响应特性。评价结合无损检测结果, 形成完整报告, 确保容器符合标准。

## 2 新型大容积高压储氢容器关键技术创新

### 2.1 轻量化内胆材料开发

轻量化内胆材料开发是提升大容积高压储氢容器储氢质量密度的关键, 核心目标是在保证密封性、耐氢性及力学性能的前提下, 最大限度降低内胆自重。目前研发重点集中在高性能铝合金、钛合金及工程塑料三大方向。高性能铝合金材料通过成分优化, 添加镁、硅、铜等合金元素, 经时效热处理提升强度与耐氢脆性能, 其中6061-T6铝合金因良好的成型性和性价比已实现规模化应用, 新型7000系铝合金通过细化晶粒技术, 强度较传统材料提升20%以上, 且氢渗透率显著降低。钛合金材料凭借优异的耐氢脆性能和比强度, 成为高端储氢容器的理想选择, 通过 $\beta$ 钛合金成分设计和近净成型工艺, 解决了传统钛合金成本高、加工难度大的问题, 使内胆重量进一步降低。工程塑料内胆材料以聚酰胺、聚酰亚胺等为基础, 通过添加碳纤维增强剂和抗氢渗透涂层, 提升材料强度和阻隔性能, 其中改性聚酰亚胺内胆的氢渗透系数较普通塑料降低一个数量级, 同时耐高低温性能优异, 适用于极端环境下的储氢需求。材料开发过程中需通过拉伸试验、氢渗透试验等全面验证性能, 确保满足高压储氢要求<sup>[2]</sup>。

### 2.2 高性能纤维缠绕工艺

高性能纤维缠绕工艺是保障大容积高压储氢容器强度与轻量化的核心技术, 通过精准控制纤维铺设参数, 实现缠绕层与内胆的协同承载。目前创新重点集中在纤维选材、缠绕路径优化及成型工艺控制三个方面。纤维选材上, 采用高强度、高模量的碳纤维替代传统玻璃纤维, 其中T800级碳纤维的抗拉强度超过5.5GPa, 通过表面改性处理提升与树脂基体的结合力, 使缠绕层的承载效率提升15%以上。缠绕路径优化采用计算机辅助缠绕设计系统, 根据容器结构特点和应力分布规律, 规划螺旋缠绕与环向缠绕的组合路径, 在应力集中的端部区域增加缠绕层数, 在圆柱段采用最优缠绕角度, 确保纤维方向与应力方向一致, 最大限度发挥纤维强度。成型工艺控制方面, 开发恒温恒湿缠绕环境系统, 精确控制树脂粘度和固化温度, 采用在线张力监测技术, 实时调整纤维张力, 避免缠绕层出现气泡、分层等缺陷。同时, 创新采用机器人自动化缠绕设备, 实现缠绕过程的精准控制, 缠绕精度误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内, 大幅提升缠绕层的均匀性和稳定性, 确保容器整体力学性能达到设计要求。

### 2.3 端部密封结构创新

端部密封结构是大容积高压储氢容器防止氢气泄漏的关键部位, 其创新设计需解决高压工况下密封可靠性、拆装便利性及耐老化性等核心问题。传统密封结构存在密封面易磨损、密封压力分布不均等缺陷, 新型结构通过结构优化和材料创新实现性能提升。目前主流创新方案包括金属-复合材料组合密封和弹

性体增强密封两种类型。金属-复合材料组合密封采用铝合金密封环与碳纤维增强复合材料压盖配合, 密封环表面加工梯形密封槽, 填充柔性石墨密封材料, 通过螺栓预紧力使密封材料产生塑性变形, 形成多道密封界面, 有效阻断氢气渗透路径, 该结构在70MPa压力下密封泄漏率低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ 。弹性体增强密封采用氯化丁腈橡胶作为密封基体, 添加碳纤维和纳米二氧化硅增强剂, 提升弹性体的强度和耐氢老化性能, 设计唇形密封结构, 利用高压氢气压力实现自紧密封, 压力越高密封效果越好, 同时采用分体式结构设计, 便于安装和维护。另外, 创新采用激光焊接技术实现密封部件的一体化连接, 减少密封面数量, 结合表面等离子喷涂技术形成耐磨涂层, 延长密封结构的使用寿命, 确保长期服役过程中的密封可靠性。

### 2.4 智能监测系统集成

智能监测系统集成是提升大容积高压储氢容器安全运行水平的重要创新方向, 通过融合多传感技术、数据传输与分析技术, 实现对容器运行状态的实时监测与故障预警。系统主要由传感监测模块、数据处理模块和预警模块三部分组成。传感监测模块采用分布式光纤传感器和微型压力传感器组合方案, 分布式光纤传感器沿容器轴向和环向布置, 通过光时域反射技术监测容器的应变分布和温度变化, 分辨率达到 $0.1 \mu \varepsilon$ , 能够及时捕捉局部应力集中现象; 微型压力传感器嵌入内胆与缠绕层之间, 实时监测界面压力变化, 确保两层协同工作<sup>[3]</sup>。数据处理模块采用边缘计算技术, 对传感器采集的海量数据进行实时处理, 通过建立力学性能预测模型, 将监测数据与理论计算结果对比分析, 识别异常数据。预警模块通过5G通信技术实现数据远程传输, 结合云端平台构建故障诊断专家系统, 当监测指标超过阈值时, 立即发出声光预警信号, 并推送故障位置、故障类型及处理建议给管理人员。此外, 系统还具备历史数据存储和趋势分析功能, 通过对长期运行数据的分析, 预测容器寿命衰减趋势, 为维护保养提供科学依据, 实现容器的全生命周期智能化管理。

## 3 新型大容积高压储氢容器的制造工艺与质量控制

### 3.1 核心制造流程

新型大容积高压储氢容器的核心制造流程需严格遵循标准化作业规范, 涵盖内胆成型、缠绕层制备、端部装配、固化处理及成品检测五大关键环节, 各环节紧密衔接确保产品质量。内胆成型环节根据材料类型采用不同工艺, 铝合金内胆采用旋压成型技术, 通过数控旋压设备实现内胆筒身与封头的一体化成型, 壁厚公差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内; 塑料内胆采用注塑成型工艺, 通过精密模具确保内胆尺寸精度, 成型后进行退火处理消除内应力。缠绕层制备环节先对内胆表面进行喷砂和涂胶处理, 增强与树脂基体的结合力, 再采用自动化缠绕设备按照预设路径铺设碳纤维, 同步完成树脂浸渍, 确保缠绕层均匀致密。端部装配环节采用机器人辅助装配技术, 将密封组件、接口部件与内胆精准对接, 通过扭矩控制系统精确控制螺栓预紧力, 保证装配精度。固化处理环节采用阶梯式固化工艺, 在专用固化炉内按照升温-保温-降温的曲线控制温度, 确保树脂充分固化, 提升缠绕层与内

胆的结合强度, 固化过程中实时监测炉内温度分布, 避免出现固化不均缺陷。成品检测环节开展水压试验、气密性试验及无损检测等项目, 全面验证产品性能, 合格后方可入库出厂, 整个流程通过MES系统实现全程溯源管理。

### 3.2 关键工艺控制

新型大容量高压储氢容器的关键工艺控制需聚焦影响产品性能的核心工序, 通过精准控制工艺参数实现质量提升。内胆成型工艺控制中, 铝合金旋压需控制旋轮转速、进给量及加热温度, 确保内胆表面光滑无裂纹, 针对7000系铝合金需采用分段旋压工艺, 避免成型过程中出现应力集中; 塑料内胆注塑需控制熔融温度、注塑压力及冷却速度, 熔融温度波动范围控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内, 防止出现缩孔、气泡等缺陷。缠绕工艺控制需实时监测纤维张力、树脂含量及缠绕速度, 纤维张力偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内, 树脂含量控制在35%~40%之间, 通过闭环控制系统及时调整工艺参数, 确保缠绕层均匀性。固化工艺控制需制定精准的固化曲线, 升温速率控制在 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内, 保温阶段温度波动不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 根据不同树脂类型确定保温时间, 确保树脂完全固化且无内应力。端部密封装配控制需采用扭矩传感器精确控制螺栓扭矩, 扭矩偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内, 装配后进行气密性测试, 确保密封性能符合要求, 各关键工艺均需建立工艺参数数据库, 实现参数的追溯与优化。

### 3.3 无损检测技术

新型大容量高压储氢容器的无损检测技术需覆盖制造全过程, 针对内胆、缠绕层及密封部位的不同缺陷类型, 采用多种检测技术组合方案, 确保缺陷的精准识别与评估。内胆检测方面, 铝合金内胆采用超声检测和涡流检测相结合的方式, 超声检测采用相控阵技术, 检测频率设置为5~10MHz, 能够有效检测内胆内部的裂纹、夹杂等缺陷, 检测灵敏度达到0.1mm; 塑料内胆采用超声相控阵和红外热成像检测, 红外热成像通过加热内胆表

面, 检测温度分布差异, 识别内部气泡和分层缺陷。缠绕层检测采用超声C扫描和射线检测技术, 超声C扫描能够清晰显示缠绕层的厚度分布、分层及未浸润缺陷, 检测分辨率达到0.05mm; 射线检测采用数字化射线成像技术, 针对缠绕层与内胆界面区域进行重点检测, 识别界面剥离缺陷<sup>[1]</sup>。端部密封部位检测采用超声脉冲回波技术和氦质谱检漏技术, 超声脉冲回波检测密封组件的装配精度和内部缺陷, 氦质谱检漏通过充入氦气, 检测泄漏率, 泄漏率控制标准为低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ 。此外, 开发无损检测数据融合分析系统, 将不同检测技术的结果进行整合, 通过人工智能算法识别缺陷类型和大小, 生成检测报告, 同时建立缺陷数据库, 为工艺优化提供数据支持, 确保每台容器均通过严格的无损检测方可出厂。

## 4 结束语

新型大容量高压储氢容器的研制在提升储氢效率、保障安全运行等方面取得重要进展。通过轻量化内胆材料开发、高性能纤维缠绕工艺等关键技术创新, 以及严格的制造工艺与质量控制, 容器的性能得到显著提升。未来, 随着氢能产业的持续发展, 需进一步优化容器设计、改进制造工艺, 提高其经济性与可靠性, 为氢能的大规模应用提供坚实保障, 推动能源结构转型。

### [参考文献]

- [1]李智勇, 陆冬青. 新型大容量高压储氢容器的研制[J]. 机械制造, 2025, 63(7): 29-34, 52.
- [2]张加俏, 赵晓航, 王朝, 等. 深冷高压储氢气瓶复合材料层低温力学性能分析与优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 21-29.
- [3]千兵, 徐朝阳, 赵冠熹, 等. 室内空间车载高压储氢气瓶泄漏扩散数值模拟分析[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(4): 51-58.
- [4]王修磊, 杨卫民, 谢鹏程. 高压大容量IV型储氢瓶内胆滚塑成型工艺及装备[J]. 压力容器, 2022, 39(12): 1-9.